

ANALISIS BEBAN LEDAKAN DAN PENGARUHNYA TERHADAP STRUKTUR PORTAL BAJA

Mustika Joni¹⁾, Reni Suryanita²⁾, Alfian Kamaldi³⁾

¹ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

Email: mustika.joni@student.unri.ac.id

² Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

Email: reni.suryanita@eng.unri.ac.id

³ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Jl. Subrantas KM 12.5 Pekanbaru 28293

Email: akamaldi@lecturer.unri.ac.id

Abstract

Bomb explosions in Indonesia have occurred relatively more frequently and become a real threat to society. In the blast phenomena, loss of life and injuries to occupants can result from the structural collapse. Therefore it were necessary to do an analysis of the effect under blast load on the building with the aim of this research was to analyze the condition of the frame on a structure based on analysis of internal forces and structural response due to blast load. The building structure model was a steel frame structure of 5 story with a typical floor to floor height of 4 m. Variations of explosive weights of 500 kg and 1.000 kg of TNT were applied to a building structure model have converted into a static load at distance 25 m of blast source. To define the blast load on the structure, ATBLAST software will be used, and to determine blast load parameters need to be calculated with Pythagoras Theorem based on TM 5-1300-1990. Analysis was performed with Finite Element Method (FEM) software with linier static method will be used, the results of analysis were axial and moment force. The axial force was 621,28 kN, moment force weakness axis direction was -665,93 kN-m and moment force strong axis direction was 0,48 kN-m. Based on this analyze it can be concluded that the internal forces have occurred proportional to the explosive weights of the building structure and frame conditions in the structure model was considered still allowable to received blast load of 500 kg TNT, however for the 1.000 kg of TNT explosive weights, structure model was collapse.

Keywords: Blast load, inform force, linier static

A. Pendahuluan

Struktur baja pada dunia konstruksi modern semakin menjadi pilihan sebagai bahan struktur pada bangunan gedung maupun non-gedung. Hal ini dikarenakan penggunaan baja lebih praktis dibandingkan dengan penggunaan beton karena memiliki durasi pelaksanaan proyek yang lebih pendek, sehingga resiko keterlambatan yang terjadi menjadi lebih kecil. Selain itu pekerjaan dapat dilakukan jauh lebih aman dan mudah, seperti persiapan, pemasangan, dan perawatan. Disamping memiliki beberapa kelebihan, material baja juga memiliki kelemahan diantaranya adalah sangat rentan terhadap temperatur. Kenaikan temperatur dapat disebabkan oleh peristiwa kebakaran dan ledakan bom.

Ledakan bom menimbulkan gelombang ledakan yang menyebar melalui medium gas, cair atau padat.

Peristiwa pengeboman di Indonesia menjadi ancaman nyata bagi masyarakat. Dalam peristiwa pengeboman, keruntuhan struktur pada bangunan merupakan hal yang mempengaruhi jumlah korban jiwa. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis mengenai pengaruh beban ledakan terhadap gedung.

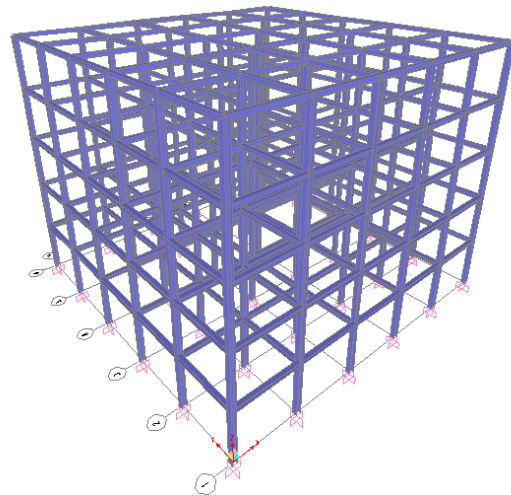
Beban ledakan yang dijadikan sebagai studi kasus pada tulisan ini adalah beban ledakan yang dikonversikan menjadi beban *static* yang bekerja pada *joint*, beban ledakan dihitung menggunakan *software ATBLAST* dan Persamaan Pythagoras yang mengacu pada standar referensi *TM-5-1300* seperti yang telah dilakukan oleh peneliti

sebelumnya yaitu Jayasooriya (2010), melakukan respon dan kerusakan pada *frame* bangunan beton bertulang dengan beban tepi yang bekerja pada komponen struktural utama bangunan yang dekat dengan peristiwa ledakan. Analisis *linier static* merupakan pilihan paling tepat karena merupakan metode yang paling mendekati untuk menganalisis kondisi dan kekuatan *frame* berdasarkan nilai gaya-gaya dalam yang terjadi pada masing-masing *frame*.

Tulisan ini bertujuan untuk menentukan gaya-gaya dalam berupa gaya aksial dan momen dengan manfaat sebagai bahan acuan dalam merencanakan struktur yang tahan terhadap ledakan beserta mengetahui perilakunya ketika menerima beban ledakan.

Analisis dilakukan dengan asumsi sebagai berikut:

1. Struktur bangunan yang dianalisis adalah struktur bangunan portal baja beraturan 5 lantai,
2. Sumber beban ledakan berada di luar struktur gedung yaitu pada sisi bagian depan struktur,
3. Analisis perhitungan beban ledakan menggunakan *software ATBLAST*,
4. Analisis struktur menggunakan *software* elemen hingga menggunakan analisis *linier static*,
5. Profil perencanaan dimensi struktur menggunakan metode *Load and Resistance Factor Design (LRFD)*,
6. Beban ledakan memiliki variasi pada massa beban ledakan yaitu 500 kg dan 1.000 kg *TNT*,
7. Sumber ledakan berada 25 m dari struktur bangunan portal baja yang dianalisis,
8. Standar yang digunakan untuk perencanaan struktur portal baja dan analisis reposns struktur akibat beban ledakan adalah SNI-1729-2002, *FEMA-426-2003* dan *TM-5-1300-1990*.
9. Data struktur yang digunakan yaitu:
 - a. Dimensi elemen dan bentuk struktur seperti pada gambar berikut ini :



Gambar 1. Tampak Tiga Dimensi Gedung

- b. Tegangan leleh baja, $f_y = 410$ MPa
- c. Dimensi balok = *WF 300.300.10.15*
- d. Dimensi Kolom = *WF 350.350.12.19*
- e. Modulus Elastisitas, $E = 200.000$ Mpa
- f. Bentang balok = 5 m
- g. Jumlah lantai = 5 lantai dengan ketinggian antar tingkat 4 m

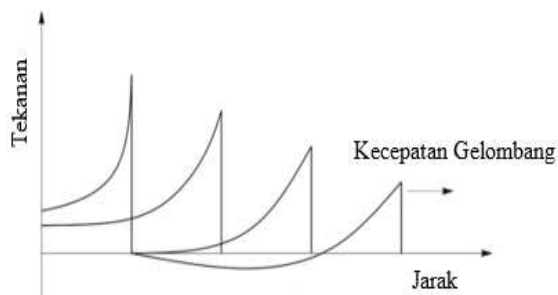
B. TINJAUAN PUSTAKA

Menurut Ngo *et al.* (2007) sebuah ledakan didefinisikan sebagai pelepasan energi yang terjadi secara tiba-tiba, cepat, dan dalam skala yang besar. Pelepasan energi secara tiba-tiba menghasilkan gelombang tekanan dalam medium sekitarnya, yang dikenal sebagai gelombang kejut yang menghasilkan tekanan (Moon, 2009).

B.1 Gelombang Ledakan

Rajendran & Lee (2009) menyebutkan bahwa gelombang ledakan memiliki kecepatan rambat melebihi kecepatan suara (supersonik), yaitu sekitar 4-25 kali lebih cepat. Besarnya gelombang ledakan yang dihasilkan bergantung terhadap massa bahan peledak yang digunakan dan jarak sumber ledakan terhadap bangunan. Semakin besar massa peledak dan jarak yang semakin dekat dari sumber ledakan, maka gelombang puncak yang dihasilkan akan semakin besar. Tekanan pada gelombang ledakan akan menurun secara teratur seiring meningkatnya jarak dari sumber ledakan.

Hal ini menyebabkan terjadinya penurunan kekuatan dan kecepatan, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2 (Ngo *et al.*, 2007).



Gambar 2. Perambatan Gelombang Ledakan

(Sumber: Ngo *et al.*, 2007)

Gelombang ledakan akan mengalami refleksi dan peningkatan pada nilai tekanannya apabila gelombang tersebut mengenai struktur (Jayasooriya, 2010).

B.2 Bahan Peledak (*Explosion*)

Bahan peledak (*explosion*) adalah bahan atau zat yang berbentuk cair, padat, gas atau campurannya yang apabila diberikan suatu aksi berupa panas, benturan, gesekan akan berubah secara kimiawi menjadi zat-zat lain yang lebih stabil, yang sebagian besar atau seluruhnya berbentuk gas dan perubahan tersebut berlangsung dalam waktu yang amat singkat, disertai efek panas dan tekanan yang sangat tinggi.

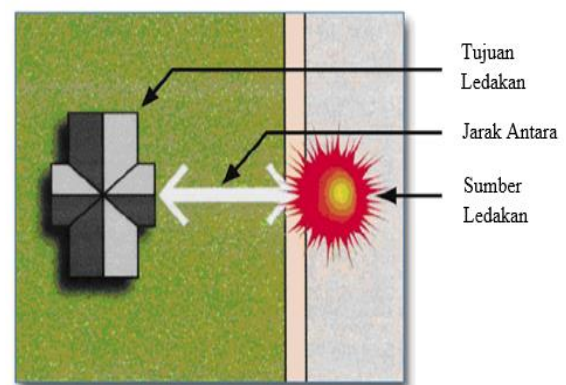
Bahan peledak terdiri dari berbagai jenis dan memiliki karakteristik yang berbeda dalam spesifikasi tertentu, seperti tingkat detonasi, efektivitas, dan besar energi yang dilepaskan. Bahan peledak terdiri atas empat kategori utama, yaitu bahan peledak utama, bahan peledak tinggi (*high explosives*), bahan peledak rendah (*low explosives*) dan bahan peledak nuklir.

Dengan terdapatnya beberapa kategori dari bahan peledak, maka diperlukan datum untuk menilai dan mengetahui karakteristik ledakan dari masing-masing bahan peledak. Dalam tulisannya, Jayasooriya (2010) menyebutkan bahwa Yandzio (1999) dalam

penelitiannya mengatakan bahwa *TNT* (*trinitrotoluena*) telah digunakan sebagai datum bahan peledak dan dianggap sebagai standar *Explosion Bench Mark*. *TNT* (*trinitrotoluena*) adalah hidrokarbon kuning pucat yang melebur pada suhu 354°K (80°C).

B.3 Jarak Antara (*Stand-off Distance*)

Semua parameter dari ledakan tergantung pada massa beban ledakan yang menghasilkan energi untuk dilepaskan dan jarak antara sasaran yang akan diledakkan dari sumber ledakan. Oleh karena itu, jarak merupakan hal sangat penting dalam menentukan besarnya gelombang ledakan yang timbul akibat suatu ledakan. Jarak tersebut dinamakan jarak antara atau *stand-off distance*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Jarak Antara (*Stand-off Distance*)

(Sumber: FEMA-426, 2003)

B.4 Parameter Gelombang Ledakan

Pada tahun 1961, Newmark dan Hansen memperkenalkan persamaan untuk menghitung gelombang puncak ledakan akibat bahan peledak. Persamaan tersebut adalah (Ngo *et al.*, 2007):

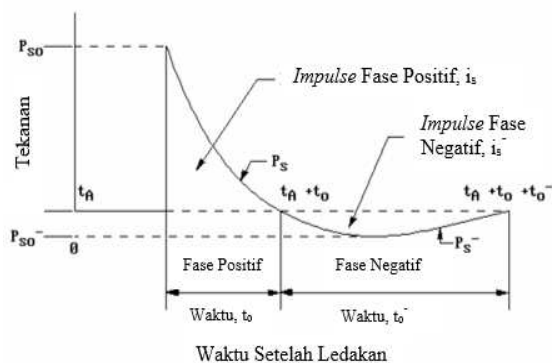
$$P_{SO} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{1/2} \quad (1)$$

P_{SO} adalah *Incident Pressure-gelombang puncak ledakan* dalam satuan bar. Pada tahun 1987, Mills memperkenalkan persamaan untuk menghitung gelombang puncak ledakan

akibat beban ledakan dalam satuan kPa. Persamaan tersebut adalah (Ngo *et al.*, 2007):

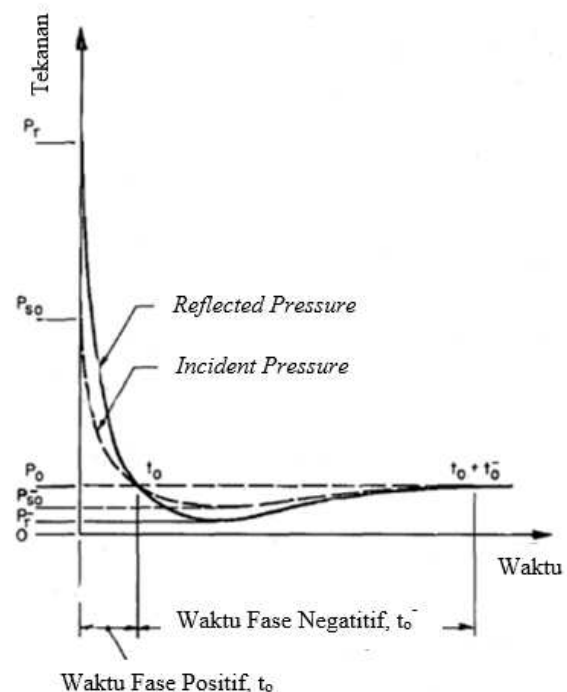
$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (2)$$

Gelombang puncak ledakan P_{so} memiliki nilai tekanan yang paling besar dari suatu ledakan, yang sangat berpengaruh terhadap kerusakan yang terjadi pada suatu struktur bangunan. Struktur gelombang ledakan dimulai dengan *ambient pressure* P_o . Pada saat gelombang menyentuh struktur bangunan, akan timbul tekanan puncak yang menghasilkan gelombang puncak ledakan P_{so} . Kemudian tekanan akan berangsur-angsur turun seiring meningkatnya waktu. Tekanan akan turun melewati batas *ambient pressure* yang disebut dengan fase negatif, kemudian tekanan akan kembali pada *ambient pressure*. Untuk lebih detailnya, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Tekanan vs Waktu untuk *Incident Pressure* (Sumber: Ngo *et al.*, 2007)

Ketika gelombang ledakan P_{so} , menemukan hambatan yang tegak lurus atau tidak sejajar dengan arah rambatan gelombangnya, gelombang tersebut akan dipantulkan dan pantulannya akan mengalami peningkatan nilai tekanan gelombang ledakan hingga mencapai gelombang puncak yang disebut *reflected pressure*. Untuk lebih memahaminya dapat dilihat secara detail pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Tekanan Maksimum vs Waktu untuk *Reflected Pressure*

(Sumber: TM-5-1300, 1990)

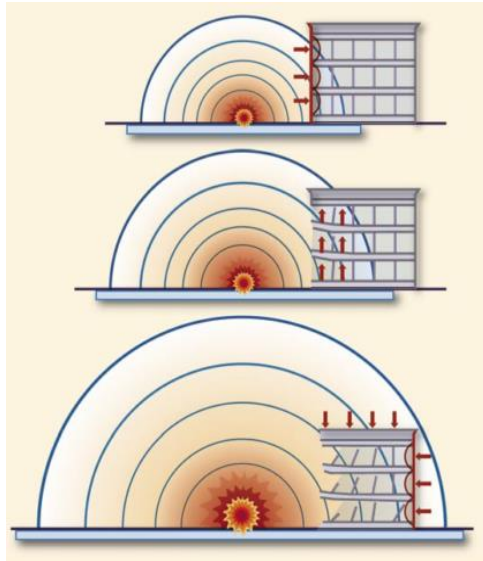
Rankine dan Hugoniot memperkenalkan persamaan untuk menghitung *reflected pressure* pada gelombang ledakan. Persamaan tersebut adalah (Hwang, 2010):

$$P_r = 2P_{so} \left\{ \frac{7P_o + 4P_{so}}{7P_o + P_{so}} \right\} \quad (3)$$

B. 5 Kerusakan Struktur Akibat Beban Ledakan

Gelombang ledakan yang merupakan gelombang kejut adalah penyebab utama kerusakan dalam peristiwa ledakan. Tekanan pada gelombang ledakan tersebut diberikan pada permukaan bangunan yang bisa saja beberapa kali lipat lebih besar dari beban yang telah ditentukan dalam merencanakan bangunan tersebut. Gelombang ledakan pertama kali akan menyerang titik terlemah bangunan, yaitu sisi paling dekat dengan sumber ledakan, yaitu *exterior* bangunan yang berupa dinding *exterior* dan jendela. Kemudian gelombang ledakan akan berkembang sehingga memasuki struktur dan memberikan gaya ke atas dan tekanan ke

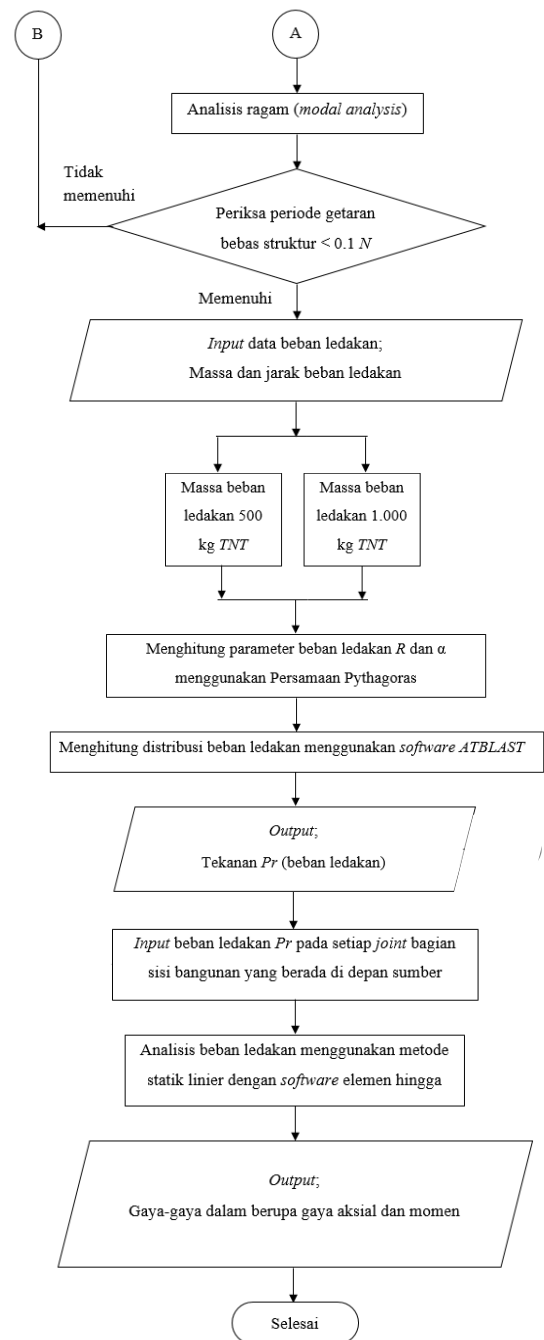
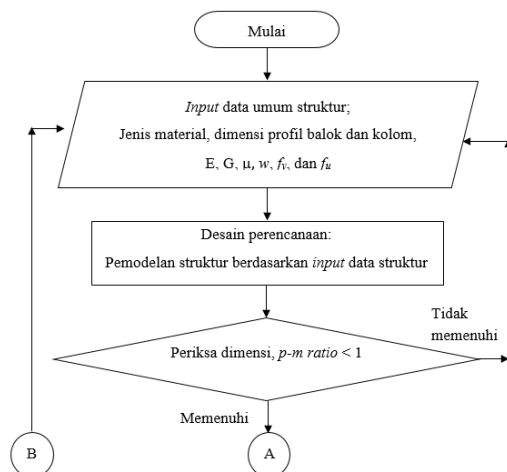
bawah pada lantai bangunan. Setelah itu gelombang ledakan akan memberikan tekanan pada seluruh struktur bangunan. Pemaparan dari efek ledakan pada bangunan lebih detailnya dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Proses Ledakan dan Kerusakan Akibat Ledakan
(Sumber: FEMA-426, 2003)

C. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan penelitian pada Tugas Akhir ini dapat digambarkan secara keseluruhan dalam bentuk diagram alir yang menggambarkan proses mulai dari pengumpulan data, perencanaan awal hingga hasil analisis struktur yang dapat dilihat pada Gambar 7 berikut.

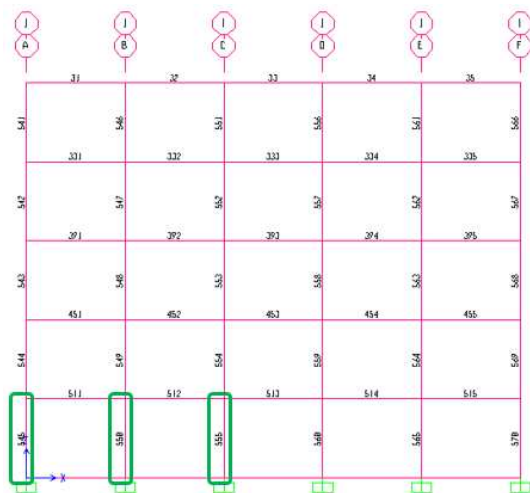


Gambar 7. Bagan Alir Penelitian

D. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Gaya-gaya dalam yang dianalisis akan ditampilkan dalam bentuk tabel yang terdiri atas gaya aksial dan momen. Terdapat 3 frame pada lantai 1 struktur yang menjadi perwakilan untuk dianalisis, yaitu C545, C550 dan C555. Dimana kolom C555 merupakan kolom terdekat dari sumber ledakan, dan kolom C545

merupakan kolom terjauh dari sumber ledakan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Tinjauan Analisis Gaya-Gaya Dalam

Hasil analisis gaya-gaya dalam dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut ini.

Tabel 1. Gaya-Gaya Dalam dengan Massa Beban Ledakan 500 kg TNT

Frame	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)	Capacity Ratio	Status
C545	372,841	-340,62	0,2105	0,839	Aman
C550	377,66	-357,39	0,1891	0,879	Aman
C555	382,333	-371,3	0,0743	0,912	Aman

Berdasarkan Tabel 1 diketahui bahwa nilai gaya aksial P terbesar pada *frame* C555 adalah 382,333 kN, gaya momen M2 terbesar untuk arah sumbu lemah pada *frame* C555 adalah -371,3 kN-m, dan gaya momen M3 terbesar untuk arah sumbu kuat pada *frame* C545 adalah 0,2105 kN-m.

Sedangkan untuk nilai gaya aksial P terkecil pada *frame* C545 adalah 372,841 kN, gaya momen M2 terkecil untuk arah sumbu lemah pada *frame* C545 adalah -340,62 kN-m, dan gaya momen M3 terkecil untuk arah sumbu kuat pada *frame* C555 adalah 0,0743 kN-m.

Nilai *capacity ratio* yang terjadi pada model struktur bangunan akibat beban

ledakan dengan massa 500 kg TNT dengan jarak 25 m adalah lebih kecil dari 1, yaitu $R < 1$. Hal ini yang menyebabkan struktur tersebut dianggap masih aman dan mampu menerima beban ledakan berdasarkan hasil analisis pada *software* elemen hingga. Karena nilai $R < 1$ maka gaya atau momen yang terjadi lebih kecil daripada gaya atau momen ijin penampang pada struktur. Oleh karena struktur menerima beban yang lebih kecil dari kemampuan struktur tersebut dalam menerima beban, maka struktur dianggap masih aman dan mampu dalam menerima beban ledakan

Tabel 2. Gaya-Gaya Dalam dengan Massa Beban Ledakan 1.000 kg TNT

Frame	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)	Capacity Ratio	Status
C545	657,87	-602,8	0,4322	1,484	Tidak aman
C550	666,997	-637,32	0,3871	1,567	Tidak aman
C555	675,626	-666,22	0,1519	1,636	Tidak aman

Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa nilai gaya aksial P terbesar pada *frame* C555 adalah 675,626 kN, gaya momen M2 terbesar untuk arah sumbu lemah pada *frame* C555 adalah -666,22 kN-m, dan gaya momen M3 terbesar untuk arah sumbu kuat pada *frame* C545 adalah 0,4322 kN-m.

Sedangkan untuk nilai gaya aksial P terkecil pada *frame* C545 adalah 657,87 kN, gaya momen M2 terkecil untuk arah sumbu lemah pada *frame* C545 adalah -602,8 kN-m, dan gaya momen M3 terkecil untuk arah sumbu kuat pada *frame* C555 adalah 0,1519 kN-m.

Nilai *capacity ratio* yang terjadi pada model struktur bangunan akibat beban ledakan dengan massa 1.000 kg TNT dengan jarak 25 m adalah lebih besar dari 1, yaitu $R > 1$. Hal ini yang menyebabkan struktur tersebut dianggap sudah *overstress* dan tidak aman, yaitu struktur sudah tidak mampu lagi menerima beban ledakan. *Capacity ratio* adalah perbandingan antara gaya atau momen *ultimate* pada penampang yang terjadi (beban terfaktor: Pu atau Mu) terhadap kuat nominal penampang (Pn atau Mn). Karena nilai $R > 1$ maka gaya atau

momen yang terjadi lebih besar daripada gaya atau momen ijin penampang pada struktur tersebut. Oleh karena struktur menerima beban yang lebih besar dari kemampuan struktur tersebut dalam menerima beban, maka struktur dianggap mengalami kegagalan.

E. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pada model yang digunakan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Gaya aksial terbesar yang diperoleh pada analisis struktur bangunan portal baja akibat beban ledakan adalah 1254,05 kN dengan massa beban ledakan sebesar 2.000 kg *TNT* dan gaya aksial terkecil adalah 372,841 kN dengan massa beban ledakan sebesar 500 kg *TNT*,
2. Gaya momen terbesar untuk arah sumbu lemah M2 yang diperoleh pada analisis struktur bangunan portal baja akibat ledakan adalah -1250,5 kN-m dengan massa beban ledakan sebesar 2.000 kg *TNT* dan gaya momen terkecil untuk arah sumbu lemah M2 adalah -340,62 kN-m dengan massa beban ledakan sebesar 500 kg *TNT*,
3. Gaya momen terbesar untuk arah sumbu kuat M3 yang diperoleh pada analisis struktur bangunan portal baja akibat ledakan adalah 0,9111 kN-m dengan massa beban ledakan sebesar 2.000 kg *TNT* dan gaya momen terkecil untuk arah sumbu kuat adalah 0,0743 kN-m dengan massa beban ledakan sebesar 500 kg *TNT*,
4. Nilai gaya-gaya dalam yang terjadi berbanding lurus terhadap massa beban ledakan yang bekerja pada struktur bangunan,
5. Kekuatan struktur pada struktur bangunan portal baja yang dianalisis dianggap masih mampu menerima beban ledakan sejauh 25 m dengan massa beban ledakan sebesar 500 kg *TNT*, akan tetapi sudah tidak mampu menerima beban ledakan sejauh 25 m

dengan massa beban ledakan sebesar 1.000 kg *TNT*.

F. SARAN

Beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat digunakan massa bahan ledakan dan jarak sumber ledakan yang lebih bervariasi pada struktur bangunan lainnya seperti jembatan,
2. Analisis dapat dilakukan dengan metode lain pada *software* elemen hingga seperti analisis dinamik *non linier* dan *software* lainnya seperti *ANSYS*,
3. Perhitungan nilai gelombang ledakan dapat menggunakan *software* lain seperti *CONWEP*.

G. DAFTAR PUSTAKA

- FEMA-426. (2003). *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*.
- Hwang, Y. S. (2010). *Three Dimensional Responses of A Steel Structure under Blast loads*. University of Southern California.
- Jayasooriya, J. H. A. R. (2010). *Vulnerability and Damage Analysis of Reinforced Concrete Framed Buildings Subjected to Near Field Blast Events*. Queensland University of Technology.
- Moon, N. N. (2009). *Prediction of Blast Loading and Its Impact on Buildings*. National Institute of Technology.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., & Ramsay, J. (2007). Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview.
- Rajendran, R., & Lee, J. M. (2009). Blast Loaded Plates. *Marine Structures*, 22(2), 99–127.
- TM-5-1300, A. (1990). *Structures To Resist The Effects of Accidental Explosions*.